

Espessura Crítica de Corte e o Ângulo de Saída da Ferramenta na Usinagem do Silício Monocristalino

Marcel Henrique Militão Dib

José Antonio Otoboni

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, CEP14801-600 Araraquara – SP, Brasil

marceldib@ifsp.edu.br; joseotoboni@ifsp.edu.br

Igor Basso

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, CEP 85884-000 Medianeira – PR, Brasil.

igorbasso@utfpr.edu.br

Alessandro Roger Rodrigues

Renato Goulart Jasinevicius

Depto Eng. Mecânica, EESC, USP, C.P. 359, CEP 13566-590, São Carlos, São Paulo, Brasil

renatogi@sc.usp.br; roger@sc.usp.br

Resumo: O silício monocristalino é um material de grande importância devido a sua aplicabilidade em dispositivos microeletromecânicos, microeletrônicos, semicondutores e ópticos infravermelhos. Por se tratar de um material tipicamente frágil e de difícil usinabilidade, o torneamento com diamante é aplicado para se obter uma superfície livre de trincas (remoção de material dúctil) e acabamento óptico. Embora o torneamento de diamante possa realizar a remoção de material no modo dúctil, determinar os parâmetros ideais para esse tipo de micro/nano usinagem é uma tarefa investigativa e experimental cara. Aqui apresentamos um estudo do efeito do ângulo de inclinação na resposta dúctil no torneamento de ultraprecisão do silício monocristalino. Os experimentos foram baseados em um método estatístico PCC (Planejamento Composto Central). Os resultados da força de corte e rugosidade foram usados para avaliar a resposta do silício monocristalino a várias condições de usinagem (velocidade de avanço e profundidade de corte) e geometria da ferramenta (ângulo de saída negativo). Os resultados mostraram que existe um ponto ótimo para o ângulo de saída que permite a resposta dúctil em ambas as direções cristalográficas do Silício, este ângulo é de $-37,5^\circ$ graus. Os resultados do acabamento demonstraram que a rugosidade R_a das superfícies cuja resposta foi dúctil é da ordem de 3 nm R_a . Os resultados da força mostraram que a força de corte é maior na direção [100]. Concluímos que o ângulo da ferramenta de corte desempenha um papel significativo no posicionamento da espessura crítica de corte em um nível mais alto. Isso, por sua vez, evita que as trincas formadas durante a usinagem atinjam a superfície de corte.

Palavras-chave: Silício Monocristalino; ferramenta de diamante; Pressão de transição; Ângulo de saída; Acabamento superficial.

1. INTRODUÇÃO

O silício (Si) é um importante material óptico de grande interesse na indústria de semicondutores (Abdulkadir et al. 2018). Contudo, ele apresenta um comportamento tipicamente frágil em temperatura e pressão atmosférica (Olufayo e Abou-El-Hossein 2013). Esse comportamento pode mudar sob altas compressões hidrostáticas (Budnitzki e Kuna 2016). Essa mudança é identificada, principalmente, pela pressão de transição (Gilman 1992).

O silício pode experimentar 12 fases distintas sob compressões variando de 0 a 230 GPa (Hull e Institution of Electrical Engineers 1999). Algumas dessas fases são termodinamicamente estáveis enquanto outras são metaestáveis. Dessas fases, a que mais interessa em processos mecânicos é a que possui características metálica (Gogotsi et al. 1998), tornando o silício suscetível a deformações (Pharr, Oliver, e Harding 1991). Essa fase é alcançada pela mudança da estrutura natural do silício (cúbica do diamante) para uma estrutura mais densa, conhecida como β -Sn, com pressões hidrostáticas entre 10 e 13 GPa (Cai, Li, e Rahman 2007).

A fase metaestável β -Sn é de grande interesse pois em uma velocidade de descompressão alta o suficiente, essa fase se transforma em uma fase amorfa (Gogotsi et al. 1998) (Clarke et al. 1988). Essa fase amorfa, por sua vez, mantém as características físicas desejadas na indução da fase β -Sn por carregamentos mecânicos.

Em usinagem com ferramenta de diamante, quando as pressões de compressões são altas o suficiente para gerar uma transição de fase (β -Sn), o mecanismo de remoção do material ocorre de forma dúctil (Blake e Scattergood 1990). Na usinagem com ferramenta de diamante este é o principal interesse, pois proporciona um acabamento superficial de nível óptico (Xiao, To, e Jelenković 2015), pois a remoção em modo dúctil fornece uma superfície acabada livre de trincas.

Essa remoção de material em modo dúctil está intrinsicamente relacionada a espessura crítica de corte (Yan et al. 2009). Essa espessura crítica em usinagem com ferramentas de usinagem de ponta arredondada, pode ser determinada pelo ombro de usinagem (Blake e Scattergood 1990). Se a espessura de corte é menor que a espessura crítica de corte, a deformação plástica é o modo dominante de remoção de material e a superfície acabada é livre de trincas (Arif et al. 2013).

Esse modo dominante de remoção, indicado pela espessura crítica e determinado pela pressão de transição, pode ser influenciado pela geometria da ferramenta (W. S. Blackley e Scattergood 1991) e a orientação cristalográfica do material (O'Connor, Marsh, e Couey 2005b). O silício, por sua vez, é um material anisotrópico, possuindo planos de trabalho com diferentes orientações cristalográficas que apresentam distintas respostas de ductilidade. O plano (100) é o mais dúctil entre eles (Yu e Qian 2013), mesmo trabalhando sobre um plano orientado (100) do Silício, existe uma diferença de comportamento na direção cristalográfica desse plano. A direção [110] apresenta maior fragilidade (Winston S. Blackley e Scattergood 1990; Mukaida e Yan 2017). Portanto, nessa direção [110] mais frágil do plano (100), as espessuras críticas de corte se apresentam em valores menores (Jasinevicius et al. 2012).

A espessura crítica de corte é um fator importante nas operações de usinagem de materiais monocristalinos tipicamente frágeis, e é influenciada por vários parâmetros da ferramenta, incluindo o ângulo de saída e o raio da ponta. Segundo Blackley e Scattergood (1991), a espessura crítica é diretamente proporcional a esses dois fatores. No entanto, vale a pena notar que o efeito do ângulo de saída no raio da ponta da ferramenta é frequentemente negligenciado nos estudos. Isso ocorre porque mudanças no ângulo de saída podem afetar o raio de corte gerado pelo raio da ponta da ferramenta durante a usinagem devido à dinâmica do processo. Portanto, não está claro se o ângulo de saída está mais fortemente correlacionado com a espessura crítica ou o raio de corte, ou ambos. Mais investigações sobre esta relação são necessárias para entender completamente o efeito dos parâmetros da ferramenta na espessura crítica de corte.

Assim, este estudo pretende avaliar se a resposta dúctil-frágil do material, a partir do ponto de vista da influência do ângulo de saída sobre o raio de corte da ferramenta, tem um efeito sobre o acabamento superficial quando o ângulo de saída se torna mais negativo. Além disso, o efeito de anisotropia, decorrente da mudança de direção cristalográfica, ainda precisa ser quantificado para que propagação de trincas superficiais sejam evitadas na fabricação de componentes ópticos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Objeto do Estudo

Neste estudo, o silício foi aplicado em usinagem de ultraprecisão com uma ferramenta de diamante de ponta circular. O tipo de Silício utilizado é o monocristalino com orientação cristalográfica de referência (100) na superfície de trabalho. Algumas propriedades (Chao 1991) e a pureza (99,98%) da amostra de Silício (EDS: *energy-dispersive spectroscopy*) são apresentadas na Figura 1a.

As ferramentas comerciais utilizadas para o experimento são de diamante monocristalino com raio de ponta de 762 μm e 100 μm , raios de aresta da ordem de 80 nm, ângulo de folga 10° e ângulo de saída de 10° apresentados pela Figura 1b-c.

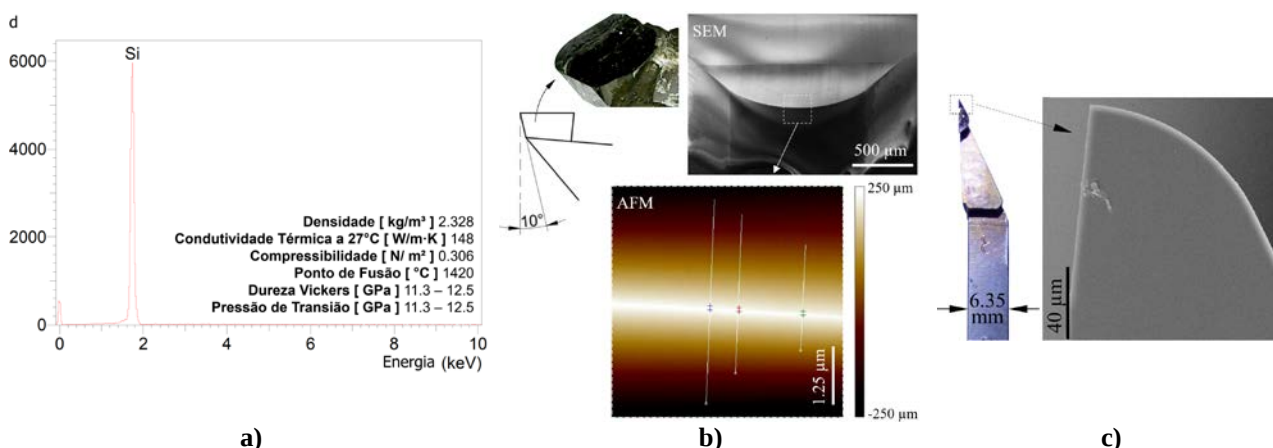


Figura 1 – Amostra e ferramentas do experimento: a) Pureza do Si por EDS (*energy-dispersive spectroscopy*) e algumas propriedades, b) Ferramenta circular de diamante monocristalino com raio de aresta de 80 nm, raio de ponta $R_\epsilon = 762 \mu\text{m}$ e $\alpha = 0^\circ$. c) Ferramenta semicircular com raio de ponta $R_\epsilon = 100 \mu\text{m}$ e $\alpha = 0^\circ$. SEM: microscopia eletrônica de varredura; AFM: microscopia de força atômica.

Os experimentos de torneamento de diamante foram realizados em uma máquina comercialmente disponível, o Aspheric Surface Generator Rank Pneumo ASG 2500. Esta máquina possui um sistema muito rígido com configuração

de carro transversal, possuindo as seguintes características: mancal hidrostático, acionado com modulação por largura de pulso servomotores DC; movimento rotativo-linear através de fusos de esferas de passo de 5 mm e feedback de posição usando interferômetro a laser; precisão de posicionamento de 10 nm.

2.2 Procedimentos experimentais

As amostras de usinagem do silício foram executadas aleatoriamente, totalizando 10 faixas de usinagem. A primeira amostra (faixa 1) encontra-se no centro do experimento e a última (faixa 10) na extremidade. Uma demonstração da usinagem da faixa 1 até a faixa 3 é ilustrado pela Figura 2a: na usinagem da primeira faixa, a ferramenta percorre toda a superfície; na segunda faixa, ela para antes para não eliminar a faixa 1; e na faixa 3 também para antes para não eliminar a faixa 2; assim sucessivamente, até a última faixa do experimento (Figura 2b). As larguras das faixas encontram-se em torno de 1mm. Para a usinagem de todas as faixas foi aplicado fluido de corte (Alkalisol 2050).

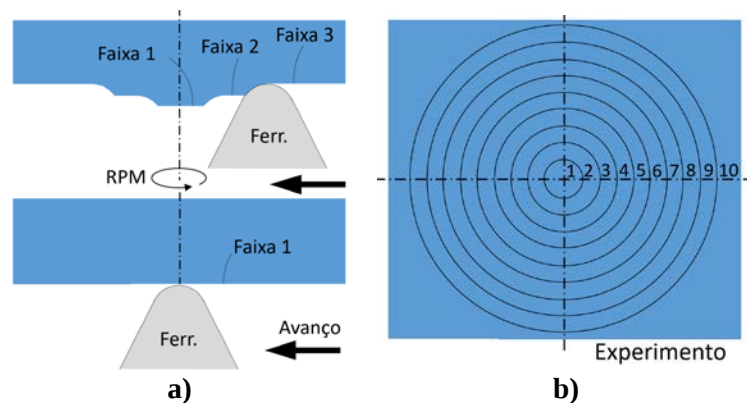


Figura 2 – Amostras coletadas (faixas) do experimento de usinagem. a) protocolo de usinagem das faixas. b) Experimento finalizado.

2.2.1 Forças de Usinagem e Pressão de Transição

Para determinara as pressões de transição é preciso medir as forças de usinagem. Para a medição das forças de usinagem foi montado um sistema de aquisição composto por: uma placa de aquisição (400 kHz), um amplificador de carga multicanal e um dinamômetro piezoelétrico (0 a 250 N; frequência natural de 2 kHz), todos comerciais. As forças foram gravadas em uma taxa de amostragem de 130 KHz por canal (130 KHz para F_x , 130 KHz para F_y e 130 KHz para F_z). O posicionamento do dinamômetro (Figura 3) foi montado de forma que a F_x forneceu a força thrust (F_t) e a F_y forneceu a força de corte (F_c). Um dispositivo capaz de se rotacionar foi projetado e fabricado para a variação do ângulo de saída da ferramenta, esse dispositivo é composto por uma base angular e por um porta-ferramenta (Figura 3). A base angular é fixada no dinamômetro, e o porta-ferramenta é fixado na base angular na posição correspondente ao ângulo de saída desejado.

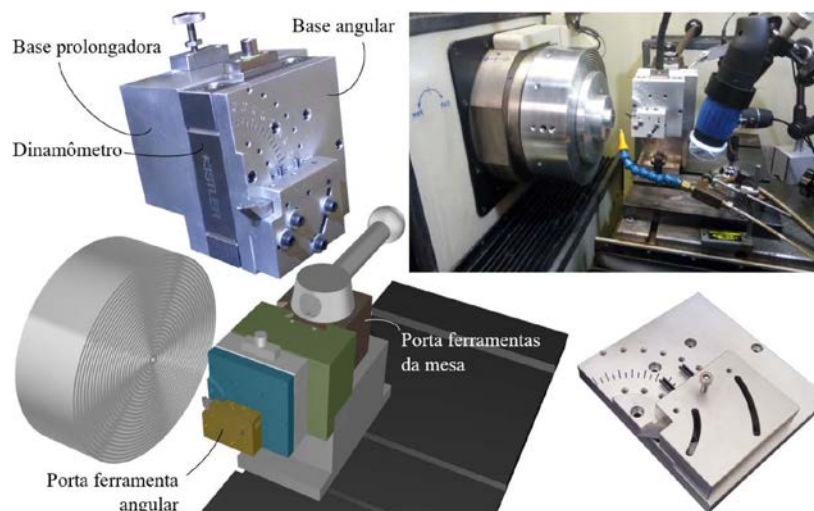


Figura 3 – Variação do ângulo de saída da ferramenta e sistema de fixação do dinamômetro.

Conforme o ângulo de saída da ferramenta é alterado, a curvatura intrínseca à aresta de corte da ferramenta de ponta circular, durante a usinagem, atua com um perfil diferente daquele correspondente ao seu raio de ponta original (R_ϵ). Para um ângulo de saída da ferramenta de 0° (Figura 4a), a ferramenta atua com um raio de corte (R_c) correspondente ao seu raio de ponta. Porém, quando o ângulo de saída da ferramenta é diferente de zero (Figura 4b), o raio de corte atuando na usinagem é maior que o raio de ponta original da ferramenta. Esse raio de corte R_c é proporcional ao aumento negativo do ângulo de saída. O aumento do raio de corte não é totalmente circular, sua forma real se assemelha a uma parábola. Contudo, uma vez que em usinagem com ferramenta de diamante o raio de ponta da ferramenta é bem maior que a profundidade de usinagem, o raio de corte pode ser muito bem estimado por um círculo.

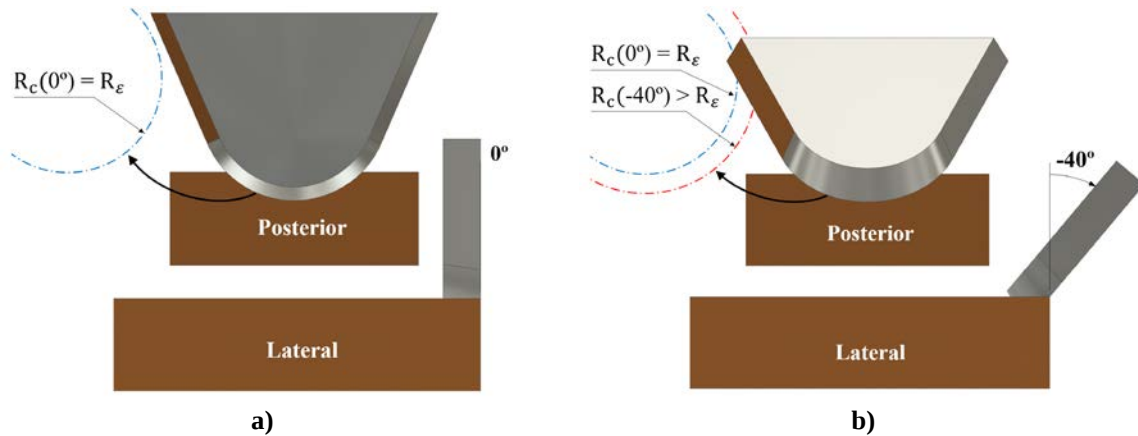


Figura 4 – Raio de corte da ferramenta. a) Raio de corte para $\alpha = 0^\circ$. b) Raio de corte para $\alpha = -40^\circ$, em que $R_c(-40^\circ) > R_c(0^\circ)$.

Assim, a espessura de corte (h), profundidade de usinagem (ap) e a área da secção de corte (As), são aquelas correspondentes à camada a ser removida, a qual está à frente da ferramenta, sem possuir qualquer relação com o ângulo de saída, conforme convencionado pela literatura (Shaw, 2005; Boothroyd and Knight, 2006).

Por outro lado, a espessura efetiva de corte (h_e), a profundidade efetiva de usinagem (ap_e) e a área efetiva da secção de corte (As_e) são aquelas correlacionadas com a inclinação da ferramenta (Figura 4), e serão influenciadas pelo ângulo de saída (α).

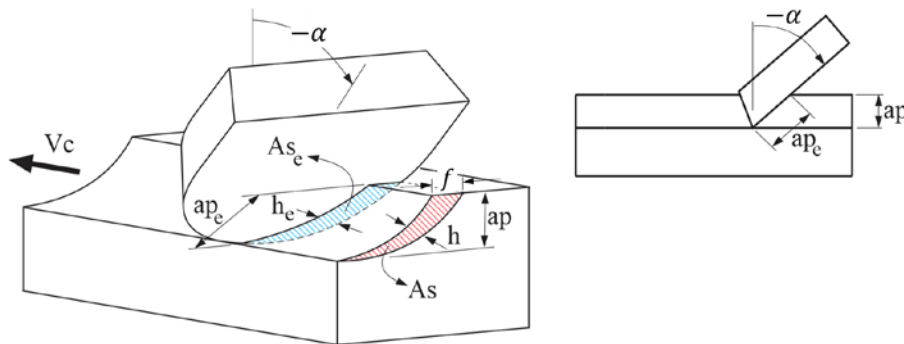


Figura 5 – Espessura de corte (h) e a efetiva (h_e); Profundidade de usinagem (ap) e a efetiva (ap_e); Área da secção de corte (As) e a área efetiva da secção de corte (As_e).

A pressão de transição de corte (k_N) é determinada, então, pela decomposição da Força Thrust e Força de Corte (F_t e F_c), distribuídas na área efetiva da secção de corte (As_e), conforme expresso pela Equação (1).

$$k_N = \frac{F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha}{As_e} \quad (1)$$

$$As_e = \frac{f \cdot ap}{\cos|\alpha|} \quad (2)$$

f: avanço da ferramenta por revolução; ap: profundidade de usinagem; α : ângulo de saída da ferramenta

2.2.2 Espessura crítica-efetiva de corte

Cada faixa usinada do experimento constitui-se de um ombro de corte (Figura 6), formado pela profundidade de usinagem (a_p) e ao raio de corte (R_c).

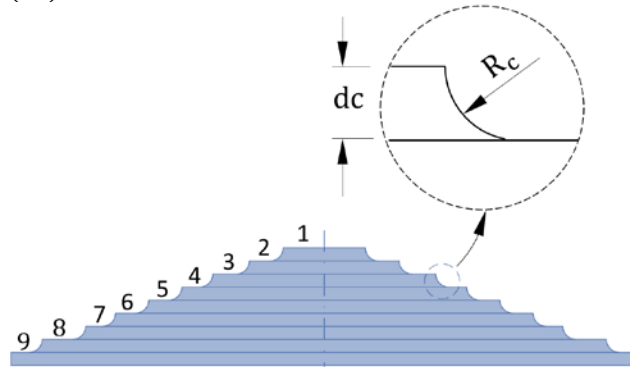


Figura 6 – Ombro de corte

É possível identificar o início do surgimento de fraturas por meio dos ombros de corte: quando a espessura efetiva de corte (h_e) atinge um valor crítico, denominado h_e^* , em que o material não suporta mais deformações e ocorre a transição de fase para a estrutura cristalina natural do material (frágil). Quando uma fratura ocorre no ombro de usinagem (Figura 7), é possível determinar a profundidade de corte crítica (a_p^*) correspondente àquela fratura. Com essa informação, é possível calcular a espessura efetiva de corte crítica (h_e^*) usando as equações apresentadas na Figura 7."

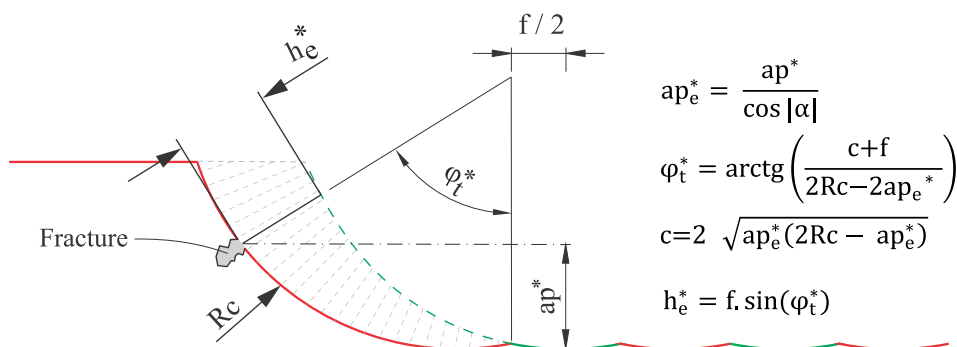


Figura 7 – Ombro de corte: determinação da espessura crítica-efetiva de corte .

2.2.3 Acabamento Superficial

Para medir o acabamento superficial das amostras usinadas, um microscópio laser confocal foi utilizado. A técnica de análise foi a rugosidade S_q (rugosidade quadrática média avaliada sobre a superfície tridimensional). Para cada faixa de usinagem foram realizadas seis medições: três medidas na direção [100] e três medidas na direção [110].

2.3 Análise dos Dados

A técnica estatística aplicada para realização do experimento é o Planejamento Composto Central (PCC). Esse planejamento é um fatorial de 1ª ordem aumentado por pontos adicionais para permitir a estimação dos parâmetros de uma superfície de 2ª ordem. O método adotado aqui será o de rotabilidade proposta por Box et al. (2005). As variáveis independentes são: o avanço da ferramenta (f) e o ângulo de saída da ferramenta (α).

O menor valor de avanço para a matriz estatística PCC é de 2,5 $\mu\text{m}/\text{rev}$ (um pressuposto elaborado por meio de resultados de endentação Vickers). Para o ângulo de saída da ferramenta, optamos por determinar 0º o menor valor dessa matriz estatística.

A Tabela 1 apresenta a matriz estatística PCC para execução do experimento de usinagem. Para chegarmos ao ponto mínimo (codificação -1,41) da matriz, adotamos um ponto central (codificação 0: $f 4.0 \mu\text{m}/\alpha -22.5^\circ$) de modo que a

codificação +1 e -1 variem 1 $\mu\text{m}/\text{rev}$ e 15° para f e α respectivamente. Assim, a Equação 11, que determina os pontos adicionais ($\pm 1,41$), fornece o ponto mínimo desejado ($f 2.5 \mu\text{m}/\alpha 0^\circ$).

$$\epsilon_{(\pm 1,41)} = \epsilon_{(0)} \pm 1.41 \left(\frac{\epsilon_{(+1)} - \epsilon_{(-1)}}{2} \right) \quad ; \text{ onde } \epsilon \text{ é o valor de } f \text{ ou } \alpha \text{ correspondente a codificação.} \quad (3)$$

A profundidade de usinagem (a_p) foi mantida constante em 10 μm (um pressuposto elaborado por meio dos resultados dos testes de endentação Vickers). A rotação constante adotada para o experimento foi de 1000 rpm, que proporcionou valores médios de velocidade de corte da ordem de 40 m/min – uma velocidade baixa para usinagem, visando minimizar o efeito do calor. A ordem de execução dos pontos do experimento (Amostras) foi escolhida aleatoriamente, como apresentado pela Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz experimental do planejamento composto central com fatores de entrada o avanço de usinagem f ($\mu\text{m}/\text{volta}$) e o ângulo de saída da ferramenta α (°).

Planejamento Composto Central Fatores Codificados					Experimentos**		
Codificação	f	α	f	α	f	α	Amostras*
+1,41	5,5	-45°	-1	-1	3,0	-7,5°	9
+1	5,0	-37,5°	-1	+1	3,0	-37,5°	7
0	4,0	-22,5°	+1	-1	5,0	-7,5°	10
-1	3,0	-7,5°	+1	+1	5,0	-37,5°	8
-1,41	2,5	-0°	-1,41	0	2,5	-22,5°	5
			+1,41	0	5,5	-22,5°	6
			0	-1,41	4,0	0°	1
			0	+1,41	4,0	-45,0°	2
			0	0	4,0	-22,5°	3
			0	0	4,0	-22,5°	4

* Ordem aleatória de execução das amostras (faixas)
 ** Ambiente de usinagem: fluido de corte
 ** Profundidade de corte (a_p): 10 μm
 ** Rotação do eixo árvore: 1000 rpm

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A grande dificuldade de se usar a matriz estatística PCC é determinar o intervalo certo do experimento. Se o intervalo não comporta o ponto de inflexão dessa amostragem em relação a população, não é possível chegar em conclusões mais precisas com base no objetivo da análise. Neste trabalho objetivou os limites da remoção de material no modo dúctil. Portanto, o ponto de inflexão do intervalo deve estar entre remoção frágil e remoção dúctil. Nesse sentido, por meio de pré-testes foi possível determinar esse ponto de inflexão que determinou o melhor intervalo para a matriz PCC. Por meio dessa matriz obtivemos as superfícies de resposta da pressão de transição de corte e do acabamento da peça. As curvas de níveis das superfícies de resposta da pressão de transição nos possibilitaram um mapeamento preciso da região dúctil-frágil. Com base nesse mapeamento, parâmetros para operações de desbaste podem ser selecionados. As curvas de níveis dos acabamentos superficiais nos possibilitaram determinar o ângulo de saída da ferramenta para o melhor acabamento óptico da peça. Consequente, avançamos no domínio do conhecimento da espessura crítica de corte. Generalizamos sua aplicação para outros tamanhos de raio de ponta da ferramenta em diferentes ângulos de saída. Ademais, levamos em consideração a influência desse ângulo sobre o raio de ponta durante a usinagem

3.1 Experimento de Usinagem

O experimento de usinagem realizado fornece a peça da Figura 8. Cada faixa de usinagem corresponde a uma combinação da matriz experimental, partindo do centro a de número 1 até a última de número 10. O sentido horizontal ou vertical dessa figura corresponde a direção [100] e o sentido da diagonal a direção [110].

Na Figura 8, observamos diferentes tipos de corte durante o experimento de torneamento com uma ferramenta de raio de ponta de 762 μm e profundidade de usinagem constante de 10 μm . As faixas 6 e 10 apresentaram corte principalmente

frágil, enquanto as faixas 1, 3, 4 e 5 mostraram corte frágil e dútil; e as faixas 2, 7 e 8 apresentaram corte predominantemente dútil. Na direção cristalográfica [110], o corte foi preferencialmente frágil.

Em outro estudo realizado por Mukaida e Yan (2017) no silício (100), uma ferramenta de diamante com raio de ponta de 1000 μm e um ângulo de saída de -30° foi utilizada com parâmetros de usinagem variando entre 1 e 6 $\mu\text{m}/\text{rev}$ e profundidades de usinagem de até 5 μm . Os autores concluíram que a fratura frágil ocorre preferencialmente na direção [110]. Em um estudo anterior, Blackley and Scattergood, (1990) observaram danos superficiais maiores na direção [110] durante o torneamento do germânio (100), que tem uma estrutura cristalina semelhante à do silício (100)."

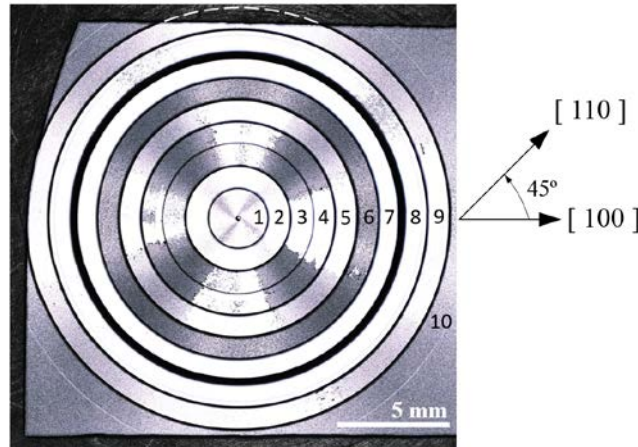


Figura 8 – Peça de silício (100) do experimento de usinagem com ferramenta de diamante (R_e 762 μm): Faixa 1 no centro até a Faixa 10 na borda.

3.2 Pressão de Transição

A Figura 9 mostra como as forças de usinagem se comportam durante todo o processo. Antes da usinagem, é possível observar o ruído do sinal. Quando a ferramenta entra em contato com a peça (início do corte), as forças começam a aumentar e se estabilizam em um valor máximo.

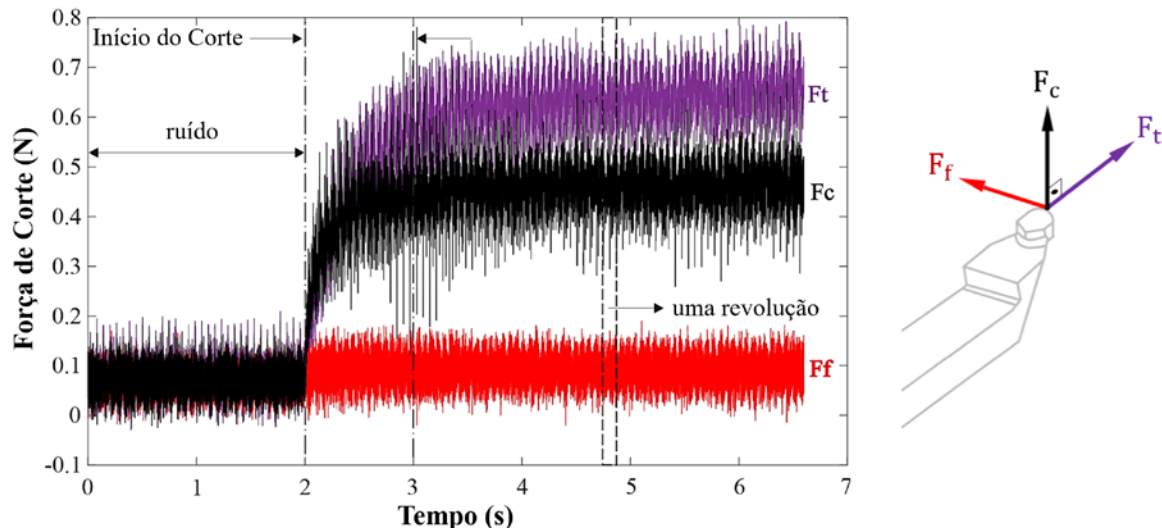


Figura 9 – Comportamento das forças de usinagem da faixa 7 (f 3,0 $\mu\text{m}/\text{rev}$, α $-37,5^\circ$) com ferramenta de diamante (R_e 762 μm) no silício (100).

Para obter mais informações sobre o comportamento das forças de usinagem, ampliamos uma parte da região de usinagem da Figura 9 (Uma revolução), correspondente a uma revolução completa da peça, e plotamos um gráfico em coordenadas polares. O resultado está na Figura 10, na qual podemos identificar o comportamento das forças em diferentes direções cristalográficas. Esse comportamento pode ser atribuído à faixa 9 da Figura 8, na qual ocorreu uma

descontinuidade da usinagem na direção [100] na direção vertical (90° na Figura 10), levando as forças a tenderem a zero nesse ponto.

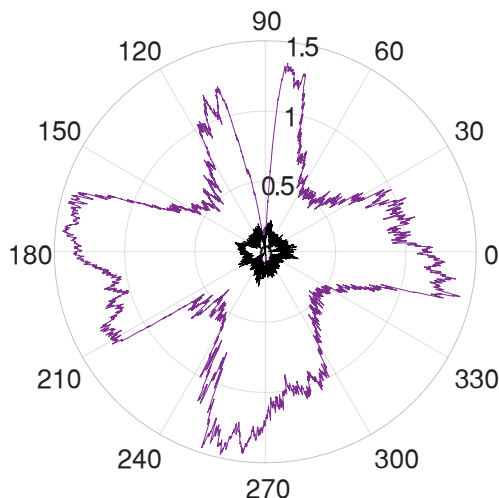


Figura 10 – Forças de usinagem em coordenadas polares da faixa 9 ($f3,0\mu\text{m}/\gamma-7,5^\circ$) em uma volta da peça. Ft: força maior; Fc: força menor. Direção [100] se encontra em 0°, 90°, 180° e 270°; direção [110]: 45°, 135°, 225° e 315°.

A Tabela 1 apresenta os valores das forças de usinagem para cada faixa do experimento

Tabela 1 – Forças médias (Newton) e desvio padrão do experimento de usinagem no Silício (100) com ferramenta de diamante ($R_e 762 \mu\text{m}$) a uma profundidade de usinagem de $10 \mu\text{m}$.

Experimentos			Fc [100]		Fc [110]		Ft [100]		Ft [110]	
f ($\mu\text{m}/\text{rev}$)	α (°)	Num	Média	Desv	Média	Desv	Média	Desv	Média	Desv
4,0	0°	1	0,715	0,026	0,585	0,012	0,828	0,083	0,470	0,036
4,0	-45,0°	2	0,705	0,008	0,455	0,019	1,036	0,022	0,552	0,041
4,0	-22,5°	3	0,565	0,097	0,183	0,008	1,057	0,208	0,132	0,008
4,0	-22,5°	4	0,324	0,018	0,113	0,006	0,745	0,046	0,128	0,017
2,5	-22,5°	5	0,512	0,002	0,191	0,003	1,239	0,012	0,403	0,001
5,5	-22,5°	6	0,320	0,012	0,207	0,000	0,633	0,023	0,313	0,001
3,0	-37,5°	7	0,512	0,028	0,420	0,013	0,688	0,046	0,482	0,038
5,0	-37,5°	8	0,706	0,012	0,642	0,011	1,006	0,014	0,899	0,020
3,0	-7,5°	9	0,536	0,032	0,271	0,013	1,220	0,105	0,426	0,048
5,0	-7,5°	10	0,403	0,015	0,286	0,010	0,865	0,043	0,517	0,012

*Desv: Desvio Padrão

A análise estatística do planejamento composto central das forças Ft e Fc (Tabela 1) sobre as áreas efetivas de contato da ferramenta possibilitou a determinação das pressões de transição frágil-dúctil do silício, conforme apresentado na Figura 11. Para identificar a transição frágil-dúctil durante a usinagem, foram cruzados os resultados de pressão das faixas do experimento com as curvas de nível da superfície de resposta. Na direção [100], apenas as faixas 6 e 10 apresentaram fraturas em suas superfícies. A curva traço-ponto (Figura 11c) delimita a área em que ocorre a transição frágil-dúctil. A região interna dessa curva representa o estado de remoção de material predominantemente frágil, enquanto a região externa indica predominância dúctil. O valor da pressão de transição é de cerca de 12 GPa.

O mesmo critério para determinar a transição frágil-dúctil foi aplicado na direção [110]. Nessa direção, apenas as faixas 7 e 2 foram predominantemente dúcteis. Entretanto, a faixa 8 é claramente o ponto de transição, pois duas das quatro direções [110] (Figura 8) sofreram fraturas. A banda que passa abaixo da faixa 7 e acima da faixa 8, delimitada pela elipse traço-ponto (Figura 11d), determina a região de transição dessa direção. Todas as outras faixas que sofreram fratura se encontram na parte interna dessa elipse traço-ponto. O valor da pressão de transição dessa banda foi de aproximadamente 13 GPa.

Na literatura, é comum afirmar que a pressão de transição para a fase metálica do Silício está entre 10 e 13 GPa (Gupta and Ruoff, 1980; Needs and Mujica, 1995; Cai et al., 2007; Yan et al., 2009). No entanto, a pressão de transição pode

variar dentro desse intervalo, dependendo do ângulo de saída e avanço da ferramenta para uma determinada direção cristalográfica do material.

A direção cristalográfica [110] gera menores forças em relação a [100], como observado na Figura 10, e esse comportamento também foi observado nos testes de O'Connor, Marsh e Couey (2005b). Além disso, a direção [110] requer uma maior pressão de compressão (13 GPa) para uma mudança de comportamento frágil para dúctil. Esses dois fatores - menor força gerada e maior pressão necessária - contribuem para uma usinagem pobre em regime dúctil nessa direção.

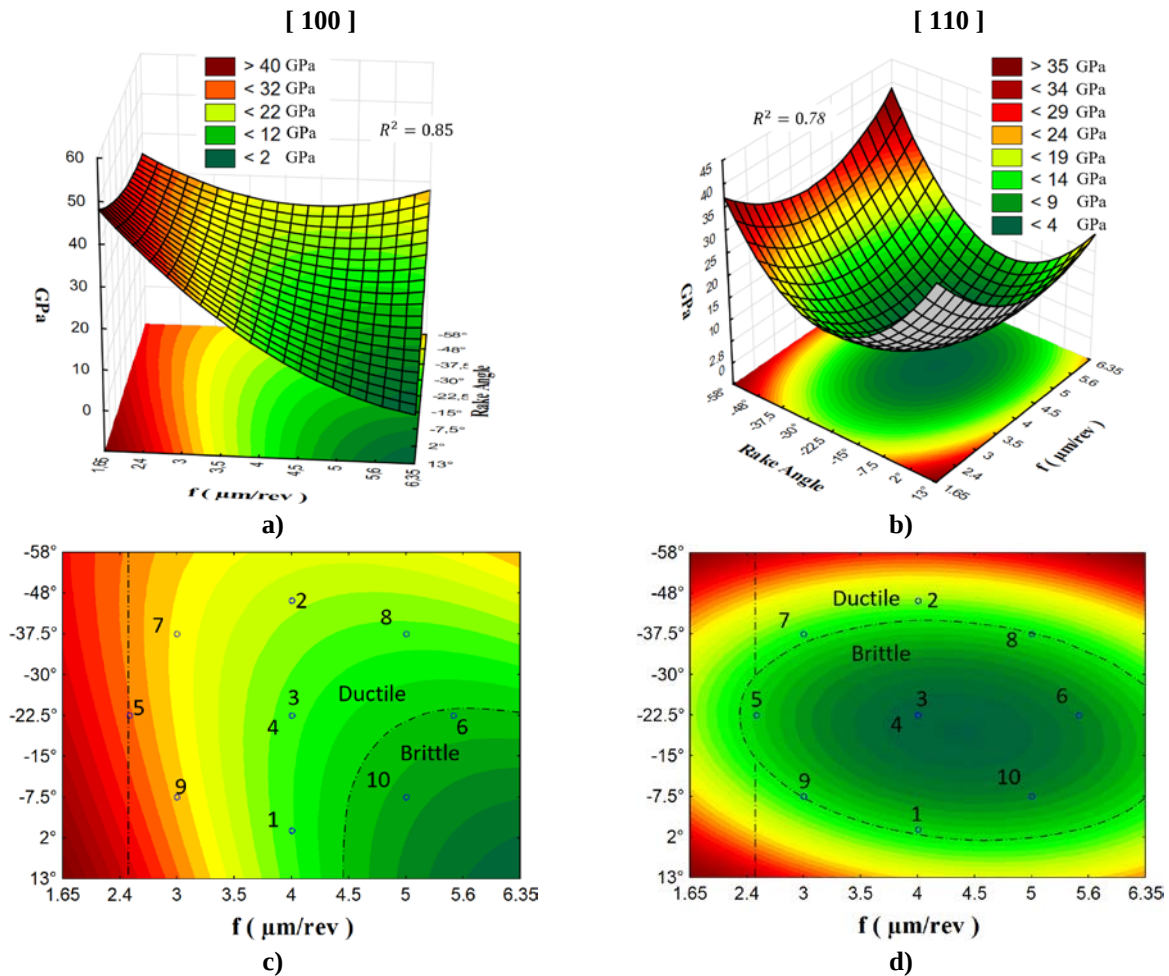


Figura 11 – Superfícies de resposta e curvas de níveis da Pressão de Transição do experimento de usinagem no Silício (100) com ferramenta de diamante ($R_\epsilon 762 \mu\text{m}$). As numerações de 1 a 10 correspondem aos valores obtidos nas respectivas faixas de usinagem.

Para obter um mapeamento da região dúctil do silício, as curvas de nível da Figura 11c e Figura 11d foram sobrepostas, conforme apresentado na Figura 12. Dependendo do avanço configurado, um ângulo crítico deve ser considerado para a usinagem em regime dúctil. Esse mapeamento pode auxiliar na determinação dos melhores parâmetros de usinagem.

Na Figura 12, observa-se que para avanços maiores que $4,5 \mu\text{m/rev}$, são necessários ângulos de saída mais negativos, da ordem de $-37,5^\circ$, para evitar fraturas na superfície da peça.

Esse fenômeno também foi observado por Zong et al. (2016) na usinagem do cristal ZnS (sulfeto de zinco), que é tipicamente frágil. Os autores sugerem que, para um dado avanço da ferramenta, um ângulo crítico de saída (-25°) deve ser considerado para obter uma superfície usinada livre de trincas.

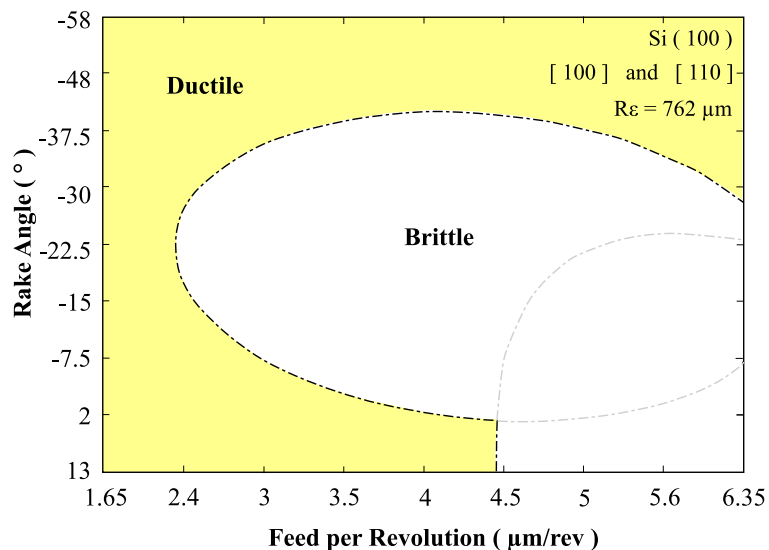
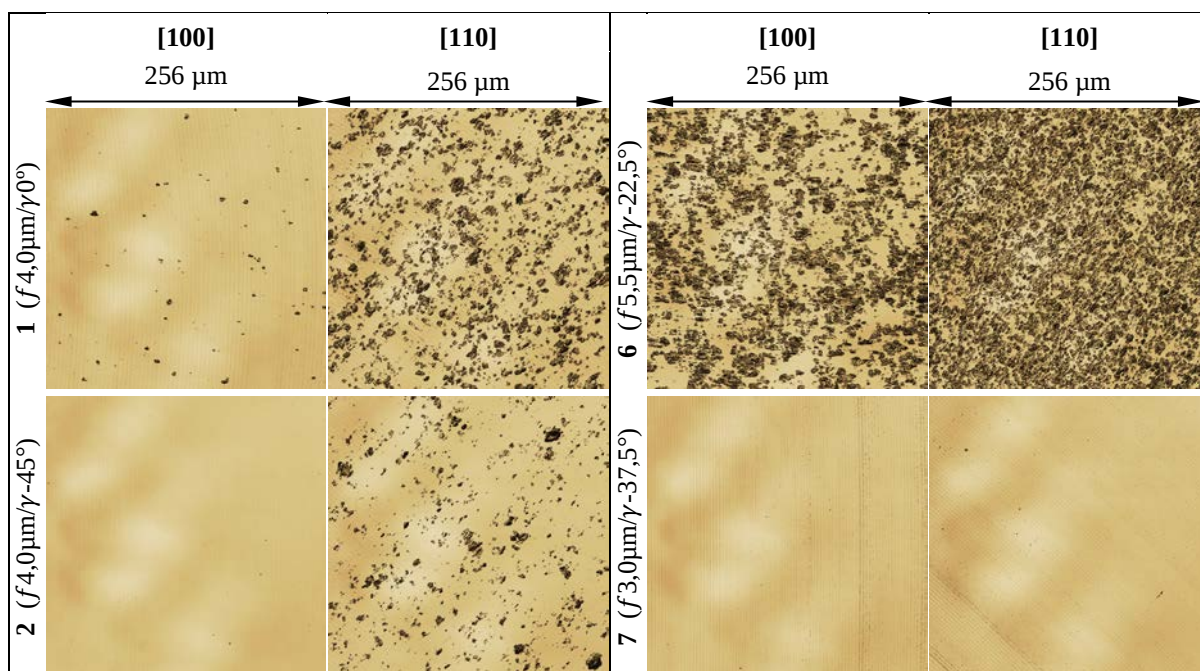


Figura 12 – Mapeamento da região dúctil do Silício (100) para operações de desbaste em usinagem com ferramenta de diamante de ponta circular $R\epsilon = 762 \mu\text{m}$.

3.3 Acabamento Superficial

De acordo com o estado das superfícies usinadas mostradas na Figura 13, as faixas 1 e 10 do experimento de usinagem na direção dúctil [100] apresentaram fraturas, enquanto apenas a faixa 7 da direção frágil [110] permaneceu livre de fraturas. As rugosidades dessas superfícies foram medidas usando um microscópio confocal. A análise da média das rugosidades revelou uma diferença significativa no acabamento (S_q) das superfícies obtidas no modo dúctil (10-13 nm) e no modo frágil (100-300 nm). É possível observar que as superfícies usinadas alternaram entre fraturadas (corte frágil) e livres de fraturas (corte dúctil). A partir das medições de rugosidade (S_q) das superfícies usinadas, geramos as superfícies de resposta do tratamento estatístico PCC. As curvas de níveis dessas superfícies de resposta são apresentadas na Figura 14, demarcando as regiões de acabamento óptico (15 nm) dentro da banda tracejada



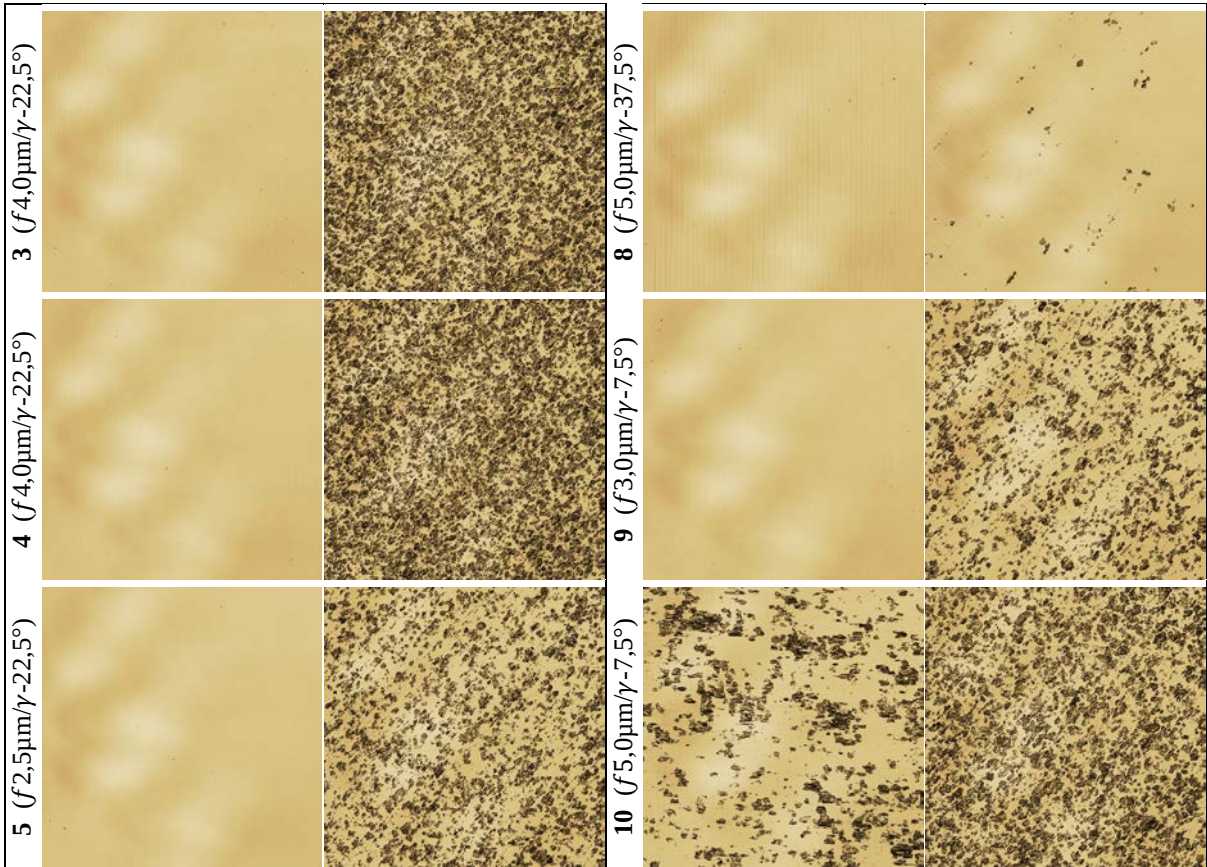


Figura 13 –Estado das superfícies usinadas com ferramenta de diamante (R_e 0,762mm).

A Figura 14 mostra que é possível obter um acabamento óptico de 15 nm na direção [100] usando altos avanços, por volta de 5 $\mu\text{m}/\text{ver}$, juntamente com ângulos de saída muito negativos, próximos a -45° . Esse comportamento também ocorre para todas as combinações de avanço e ângulo de saída dentro das bandas limite indicadas pela linha traço-ponto. No entanto, as bandas são mais estreitas na direção [110]. Para alcançar um acabamento óptico nessa direção, os avanços devem estar na faixa de 2,5 a 5,5 $\mu\text{m}/\text{rev}$, juntamente com ângulos de saída próximos a $-37,5^\circ$. Assim, para evitar danos na peça, a usinagem deve se basear na direção mais desafiadora, que é a [110], e usar ângulos de saída em torno de $-37,5^\circ$ para obter a melhor qualidade superficial.

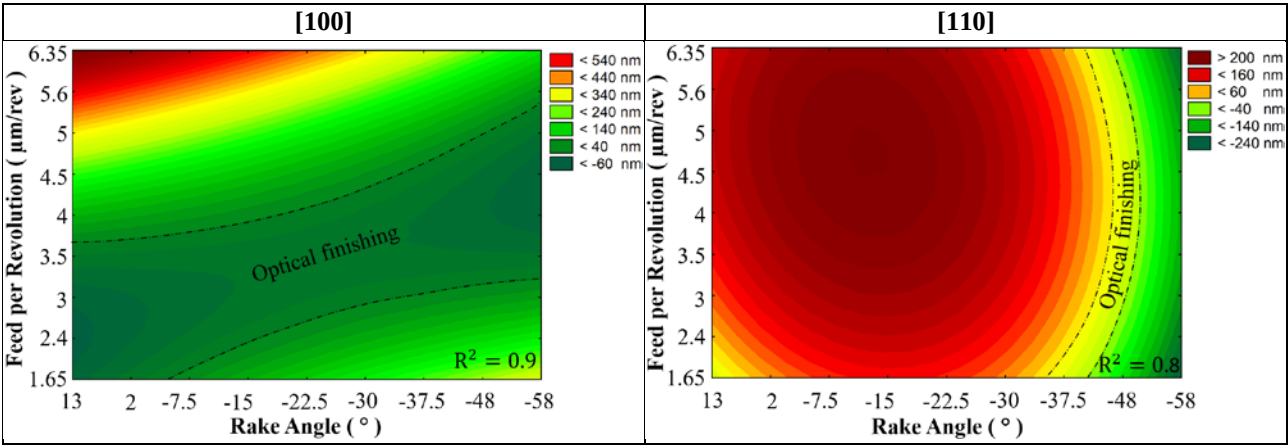


Figura 14 – Curvas de níveis da rugosidade S_q (nm) do experimento de usinagem no silício (100) com ferramenta de diamante (R_e 762 μm).

3.4 Espessura crítica-efetiva de corte

Com base nas fraturas encontradas nos ombros de corte, foram determinadas as espessuras críticas efetivas de corte do silício em função do ângulo de saída da ferramenta (Figura 15). É possível observar que a espessura crítica é diretamente proporcional ao ângulo de saída negativo da ferramenta.

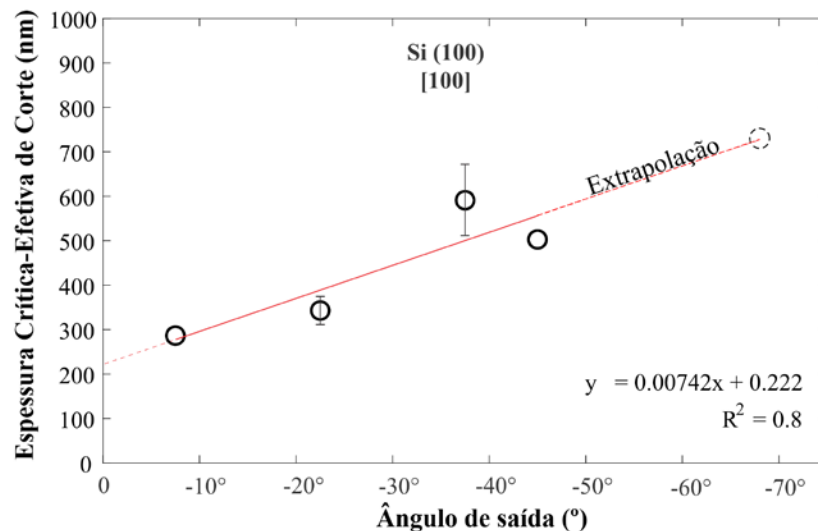


Figura 15 – Espessura crítica-efetiva de corte do Silício (100).

Com o surgimento de fraturas nos ombros de usinagem, é possível determinar a profundidade crítica correspondente (ap^*) - que é o início da propagação de trincas. Em seguida, calcula-se a profundidade crítica-efetiva de corte (ap_e^*), que juntamente com o raio de corte (R_c) e o ângulo crítico (ϕ_t^*), permite determinar a espessura de corte crítica-efetiva, h_e^* . Na direção [100], para uma variação do ângulo de saída da ferramenta de 0° a -45° , os valores das espessuras críticas-efetivas de corte deste experimento variaram de 250 nm a 550 nm.

Foi observado nos ensaios de Venkatachalam et al. (2009) que a espessura crítica aumenta com o aumento do ângulo de saída negativo em torneamento com ferramenta de diamante. Esses autores concluem que a espessura crítica é diretamente proporcional ao ângulo de saída da ferramenta.

Yan et al. (2012) realizaram experimentos de nanousinagem no silício (100), mesmo material utilizado neste trabalho, e conseguiram medir diretamente na peça a espessura de corte variando o ângulo de saída entre -15° e -45° . Na direção [100], os autores constataram uma variação da espessura crítica de corte entre 50 nm e 500 nm.

Em relação à direção [110], foi possível determinar apenas a espessura crítica-efetiva de corte na faixa 7. Todas as outras faixas apresentaram fraturas na superfície nessa direção. No entanto, ao compararmos as espessuras críticas das faixas 7 na direção [110] com a [100], observamos que $h_e^*[110]$ corresponde a 35% de $h_e^*[100]$.

A redução da espessura crítica de corte na direção [110] também foi observada por Yan et al. (2012). Nessa direção, as espessuras de corte variaram entre 100 e 150 μm . Esse mesmo comportamento foi relatado por O'Connor, Marsh e Couey (2005). Os autores concluem que a relação entre a espessura crítica na direção [110] e na direção [100] é de 33%.

Além da espessura crítica de corte, observamos que a profundidade crítica de usinagem (ap^*) deve ser maior que 2.75 μm para evitar que as trincas se propaguem a partir da espessura crítica (h_e^*) e alcancem a superfície usinada. Esse valor foi determinado pelas faixas 3 e 4. Na Figura 8, é possível ver que três das quatro direções [100] dessas faixas apresentaram pequenas fraturas na superfície. Isso indica que a altura de corte crítica-efetiva (h_e^*) está no limite necessário.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma análise experimental-estatística das direções cristalográficas do silício monocristalino (100) em usinagem de ultraprecisão com ferramenta de diamante de ponta arredondada, para diversos ângulos de saída da ferramenta e avanços de corte. O mapeamento das superfícies de resposta extraídas da matriz estatística da pressão de transição frágil-dúctil do material, delimitada em 12 GPa para a direção [100] e 13 GPa para a [110], permitiu a determinação dos melhores parâmetros de usinagem em modo dúctil: altos avanços com o ângulo de saída adequado. O mapeamento das superfícies de respostas do acabamento superficial possibilitou a determinação do ângulo de saída da ferramenta para o melhor acabamento da usinagem, em torno de $-37,5^\circ$.

Existe uma correlação intrínseca entre a espessura de corte crítica, o ângulo de saída da ferramenta e o raio de corte durante a usinagem. A consideração desses três fatores permite a generalização determinística dos parâmetros ótimos de usinagem.

5. AGRADECIMENTOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Engenharia de Precisão (PEL) do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. O estudo contou com o apoio do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), além de bolsas de pesquisa brasileiras da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), do Ministério da Educação (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

6. REFERÊNCIAS

- Abdulkadir, Lukman N., Khaled Abou-El-Hossein, Abubakar I. Jumare, Muhammad M. Liman, Tirimisiyu A. Olaniyan, e Peter Babatunde Odedeyi. 2018. "Review of Molecular Dynamics/Experimental Study of Diamond-Silicon Behavior in Nanoscale Machining". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 98 (1–4): 317–71. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2041-7>.
- Arif, Muhammad, Zhang Xinquan, Mustafizur Rahman, e Senthil Kumar. 2013. "A Predictive Model of the Critical Undeformed Chip Thickness for Ductile–Brittle Transition in Nano-Machining of Brittle Materials". *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 64 (janeiro): 114–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.08.005>.
- Blackley, W. S., e R. O. Scattergood. 1991. "Ductile-Regime Machining Model for Diamond Turning of Brittle Materials". *Precision Engineering* 13 (2): 95–103. [https://doi.org/10.1016/0141-6359\(91\)90500-I](https://doi.org/10.1016/0141-6359(91)90500-I).
- Blackley, Winston S., e Ronald O. Scattergood. 1990. "Crystal Orientation Dependence of Machining Damage-A Stress Model". *Journal of the American Ceramic Society* 73 (10): 3113–15. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb06730.x>.
- Blake, Peter N., e Ronald O. Scattergood. 1990. "Ductile-Regime Machining of Germanium and Silicon". *Journal of the American Ceramic Society* 73 (4): 949–57. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05142.x>.
- Boothroyd, Geoffrey, e Winston A. Knight. 2006. *Fundamentals of machining and machine tools*. 2º ed. New York: Marcel Dekker.
- Box, George E. P., J. Stuart Hunter, e William G. Hunter. 2005. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*. Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Statistics+for+Experimenters%3A+Design%2C+Innovation%2C+and+Discovery%2C+2nd+Edition-p-9780471718130>.
- Budnitzki, M., e M. Kuna. 2016. "Stress Induced Phase Transitions in Silicon". *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 95 (outubro): 64–91. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2016.03.017>.
- Cai, M B, X P Li, e M Rahman. 2007. "High-Pressure Phase Transformation as the Mechanism of Ductile Chip Formation in Nanoscale Cutting of Silicon Wafer". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 221 (10): 1511–19. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM901>.
- Chao, C. L. 1991. "Investigations of the Machining of Glasses and Other Normally Brittle Materials in the Ductile Regime". *PQDT - Global*. Ph.D., Ann Arbor: Cranfield University (United Kingdom). 2050026808. <https://www.proquest.com/dissertations-theses/investigations-machining-glasses-other-normally/docview/2050026808/se-2?accountid=14643>.
- Clarke, D. R., M. C. Kroll, P. D. Kirchner, R. F. Cook, e B. J. Hockey. 1988. "Amorphization and Conductivity of Silicon and Germanium Induced by Indentation". *Physical Review Letters* 60 (21): 2156–59. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.60.2156>.
- Gilman, John J. 1992. "Insulator-Metal Transitions at Microindentations". *Journal of Materials Research* 7 (3): 535–38. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.0535>.
- Gogotsi, Yury, Michael S. Rosenberg, Andreas Kailer, e Klaus G. Nickel. 1998. "Phase Transformations in Semiconductors Under Contact Loading". Editado por Bharat Bhushan. *Tribology Issues and Opportunities in MEMS*, 431–42. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5050-7_30.

- Gupta, Mool C., e Arthur L. Ruoff. 1980. "Static Compression of Silicon in the [100] and in the [111] Directions". *Journal of Applied Physics* 51 (2): 1072–75. <https://doi.org/10.1063/1.327714>.
- Hull, Robert, e Institution of Electrical Engineers, orgs. 1999. *Properties of Crystalline Silicon*. EMIS Datareviews Series 20. London: INSPEC.
- Jasinevicius, R G, J G Duduch, L Montanari, e P S Pizani. 2012. "Dependence of Brittle-to-Ductile Transition on Crystallographic Direction in Diamond Turning of Single-Crystal Silicon". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 226 (3): 445–58. <https://doi.org/10.1177/0954405411421108>.
- Mukaida, Mao, e Jiwang Yan. 2017. "Ductile Machining of Single-Crystal Silicon for Microlens Arrays by Ultraprecision Diamond Turning Using a Slow Tool Servo". *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 115 (abril): 2–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.11.004>.
- Needs, R. J., e A. Mujica. 1995. "First-Principles Pseudopotential Study of the Structural Phases of Silicon". *Physical Review B* 51 (15): 9652–60. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.9652>.
- O'Connor, Brian P., Eric R. Marsh, e Jeremiah A. Couey. 2005a. "On the effect of crystallographic orientation on ductile material removal in silicon". *Precision Engineering* 29 (1): 124–32. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.05.004>.
- O'Connor, Brian P., Eric R. Marsh, e Jeremiah A. Couey. 2005b. "On the Effect of Crystallographic Orientation on Ductile Material Removal in Silicon". *Precision Engineering* 29 (1): 124–32. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.05.004>.
- Olufayo, O. A., e K. Abou-El-Hossein. 2013. "Molecular Dynamics Modeling of Nanoscale Machining of Silicon". *Procedia CIRP*, 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO), 8 (janeiro): 504–9. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.141>.
- Pharr, G.M., W.C. Oliver, e D.S. Harding. 1991. "New Evidence for a Pressure-Induced Phase Transformation during the Indentation of Silicon". *Journal of Materials Research* 6 (6): 1129–30. <https://doi.org/10.1557/JMR.1991.1129>.
- Shaw, Milton Clayton. 2005. *Metal Cutting Principles*. New York: Oxford University Press.
- Venkatachalam, Siva, Xiaoping Li, e Steven Y. Liang. 2009. "Predictive Modeling of Transition Undeformed Chip Thickness in Ductile-Regime Micro-Machining of Single Crystal Brittle Materials". *Journal of Materials Processing Technology* 209 (7): 3306–19. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.07.036>.
- Xiao, G.B., S. To, e E.V. Jelenković. 2015. "Effects of Non-Amorphizing Hydrogen Ion Implantation on Anisotropy in Micro Cutting of Silicon". *Journal of Materials Processing Technology* 225 (novembro): 439–50. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.06.017>.
- Yan, Jiwang, Tooru Asami, Hirofumi Harada, e Tsunemoto Kuriyagawa. 2009. "Fundamental Investigation of Subsurface Damage in Single Crystalline Silicon Caused by Diamond Machining". *Precision Engineering* 33 (4): 378–86. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.10.008>.
- Yan et al. 2012. "Crystallographic Effect on Subsurface Damage Formation in Silicon Microcutting". *CIRP Annals* 61 (1): 131–34. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.070>.
- Yu, Bingjun, e Linmao Qian. 2013. "Effect of Crystal Plane Orientation on the Friction-Induced Nanofabrication on Monocrystalline Silicon", 8.
- Zong, W.J., Z.M. Cao, C.L. He, e C.X. Xue. 2016. "Theoretical Modelling and FE Simulation on the Oblique Diamond Turning of ZnS Crystal". *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 100 (janeiro): 55–71. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.10.002>.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores é são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Critical thickness of cutting and Tool Rake Angle in Monocrystalline Silicon Machining

Marcel Henrique Militão Dib

José Antonio Otoboni

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, CEP14801-600 Araraquara – SP, Brasil
marceldib@ifsp.edu.br; joseotoboni@ifsp.edu.br

Igor Basso

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, CEP 85884-000 Medianeira – PR, Brasil.
igorbasso@utfpr.edu.br

Alessandro Roger Rodrigues

Renato Goulart Jasinevicius

1Depto Eng. Mecânica, EESC, USP, C.P. 359, CEP 13566-590, São Carlos, São Paulo, Brasil
renatogj@sc.usp.br; roger@sc.usp.br

Abstract. Single-crystal Silicon is necessary due to its applicability in micro-electromechanical, microelectronic, semiconductor, and infrared optical devices. Because it is a typically fragile material that is difficult to machinability, diamond turning is applied to achieve a crack-free surface (ductile material removal) and optical finish. Although diamond turning can perform ductile-mode material removal, determining the optimal parameters for this type of micro-nano machining is an expensive investigative and experimental task. This study examines how the rake angle affects the ductile response during the ultra-precision turning of monocrystalline Silicon. We based the experiments on a PCC statistical method. Cutting force and surface roughness results were used to evaluate the response of single-crystal Silicon to varying machining conditions (feed rate and depth of cut) and tool geometry (negative rake angle). The results showed an optimal point for the exit angle that allows the ductile response in both crystallographic directions of Silicon, and this angle is at -37.5° degrees. The finishing results demonstrated the roughness R_a of the surfaces whose ductile response was 3 nm R_a . The force results showed that the cutting forces are greater in the [100] direction. We concluded that the angle of the cutting tool plays a significant role in positioning the critical cutting thickness at a higher level. This, in turn, prevents the cracks formed during machining from reaching the cutting surface.

Keywords: Monocrystalline Silicon; Diamond tool; Transition pressure; Rake angle; Surface finish

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only ones responsible for the printed material included in this paper.